

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA ABIERTA EN MODELADO OCEANICO COSTERO

Elbio D. Palma\* y Lina E. Sitz†

\* Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253, CP(8000) Bahía Blanca, Argentina. TE: 54-(0291)-4595156–Interno 2814  
Instituto Argentino de Oceanografía, CONICET  
e-mail: uspalma@criba.edu.ar

† Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253, CP(8000) Bahía Blanca, Argentina. TE: 54-(0291)-4595156–Interno 2814  
e-mail: lsitz@uns.edu.ar

**Palabras clave:** Modelos oceánicos costeros, Condiciones de frontera abierta

**Resumen.** *El tratamiento de condiciones de frontera abierta (CFA) es un problema intrínseco y distintivo asociado con la formulación de modelos regionales costeros oceánicos. Los bordes abiertos (típicamente dos perpendiculares a la costa y uno en la dirección de la misma) deben permitir la radiación de los transitorios generados localmente en el interior del dominio y la prescripción de forzantes conocidos (flujos, elevaciones) provenientes de zonas remotas. Dado que la imposición de CFA a las ecuaciones hidrodinámicas primitivas es un problema mal condicionado, es de esperar una gran sensibilidad de la solución a la especificación analítica y numérica de las condiciones en el borde. En este trabajo se presenta un estudio crítico de varias CFA empleadas rutinariamente en modelado costero con particular énfasis al problema barotrópico tridimensional con tres bordes abiertos. Se discuten experimentos numéricos idealizados de un océano costero con topografía variable y sometido a la acción del viento en la superficie y la marea en los bordes abiertos. El objetivo del estudio es llamar la atención sobre los problemas que subyacen en la aplicación práctica de los esquemas a situaciones reales. Estos problemas y sus efectos deben tenerse en cuenta tanto en la implementación y refinado de los esquemas existentes como en la interpretación de las predicciones del modelo. Finalmente, las CFA con mejor desempeño se aplican a un problema concreto de circulación oceánica sobre la plataforma continental argentina.*

## 1 INTRODUCCIÓN

La simulación de procesos costeros generados por la circulación oceánica se encuentra entre los mayores desafíos para el modelador numérico<sup>1</sup>. La región comprendida entre la costa y el talud continental, normalmente conocida como plataforma continental está sometida a la acción de intensos gradientes de densidad (descargas de río, calentamientos estacionales), vientos variables, la acción persistente de la marea y la interacción con corrientes de borde<sup>2</sup>.

La principal dificultad en el modelado de una región restringida del océano tal como una plataforma continental con suficiente resolución es el problema asociado con los bordes abiertos. Existen dos tipos básicos de Condiciones de Frontera Abierta (CFA) con las cuales debe tratar el modelador: (a) Condiciones pasivas, donde no hay forzante externo en el borde abierto y lo que se requiere de la condición de frontera es que permita la propagación de fenómenos generados en el interior sin distorsionar la solución y (b) Condiciones activas donde la condición de borde fuerza activamente a la solución interior (p.e. mareas y ondas de tormenta). Condiciones de borde perfectas, es decir aquellas que simultáneamente permitan la entrada de información externa sin impedimento y la salida de señales internamente generadas sin distorsión son difíciles de aproximar y casi imposibles de obtener, dado que el problema es analíticamente mal condicionado<sup>3</sup>.

Para simular los efectos de la marea en la circulación costera, los modelos son forzados normalmente por variaciones de elevación en la superficie en los bordes abiertos obtenidas de modelos globales. Las elevaciones en esos bordes son prescriptas como funciones del tiempo superponiendo las elevaciones periódicas sobre la elevación media debida a la circulación de gran escala. Este procedimiento implica el uso de condiciones "fijas" en los bordes donde la elevación se especifica "a priori". Una simulación adecuada de la respuesta transitoria de un océano costero o estuario debido por ejemplo a vientos variables no es posible con condiciones de frontera de este tipo<sup>4</sup>. Lo que se necesita es una forma apropiada de condición de radiación que deje el borde transparente a los transitorios y permita prescribir y mantener en el tiempo la elevación media y de marea. El objetivo de este trabajo es analizar sistemáticamente el comportamiento de una serie de condiciones de borde abierto aplicadas a una configuración sencilla y aplicar la de mejor comportamiento a un caso real: la circulación oceánica sobre la plataforma continental argentina forzada por vientos y marea.

## 2 ECUACIONES DEL MODELO Y CONDICIONES DE BORDE.

### 2.1 Ecuaciones gobernantes del problema.

En este estudio consideraremos la circulación oceánica de un océano barotrópico tridimensional, es decir la densidad del fluido es considerada constante. El modelo numérico seleccionado es el Princeton Ocean Model (POM<sup>5</sup>). Las ecuaciones gobernantes del modelo son la ecuación de continuidad y las componentes x e y de la ecuación de movimiento. En la dirección z la ecuación de movimiento se reduce a la condición hidrostática (no mostrada).

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(Du)}{\partial x} + \frac{\partial(Dv)}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \\
 & \frac{\partial(uD)}{\partial t} + \frac{\partial(uuD)}{\partial x} + \frac{\partial(uvD)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial \sigma} - f v D + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] + F_x \\
 & \frac{\partial(vD)}{\partial t} + \frac{\partial(uvD)}{\partial x} + \frac{\partial(vvD)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial \sigma} + f u D + g D \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] + F_y
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde  $\sigma = (z + \eta)/D$  es la coordenada vertical,  $u, v$  y  $w$  son las componentes de la velocidad del fluido en las direcciones  $x, y$  y  $\sigma$ ,  $\eta$  es la elevación de la superficie libre  $D = H + \eta$  es la profundidad total del fluido,  $f$  es el parámetro de Coriolis y  $K_M$  es el coeficiente de difusión vertical y  $F_x$  y  $F_y$  parametrizan difusión horizontal turbulenta.

## 2.2 Condiciones de borde implementadas

En este trabajo emplearemos básicamente condiciones de borde de radiación. Originalmente sugeridas por Sommerfeld<sup>4</sup>, las condiciones de radiación pueden ser escritas genéricamente como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C_\phi \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{2}$$

donde  $C_\phi$  es la velocidad de fase local de la variable dependiente  $\phi$ ;  $t$ , el tiempo y  $n$  es la coordenada perpendicular al borde abierto.

Debido a que el modelo numérico utilizado consta de un modo interno (variables dependientes de la profundidad) y otro externo (variables promediadas en la vertical), es posible seleccionar las condiciones de borde para cada modo. En este estudio se aplican las condiciones de borde de Orlanski<sup>6</sup> para el modo interno (descriptas más abajo), mientras que se modifican en cada caso las condiciones de borde para el modo externo. Los diferentes esquemas utilizados para este modo son:

- *Condiciones de radiación con velocidad de fase fija* ( $C_\phi = C_0 = \sqrt{gH}$ ): Esta aproximación asume que las ondas que llegan a los bordes abiertos son ondas de gravedad superficial no-dispersivas<sup>4</sup>. En los experimentos numéricos se emplean las condiciones de borde GWI, que son una implementación directa de la ecuación (2), con un método implícito y un esquema hacia adelante para la evaluación de las derivadas parciales<sup>4</sup>. Sin embargo, en ciertas circunstancias la implementación de GWI en bordes abiertos produce cambios espúreos en el nivel medio del mar<sup>7</sup>. Para minimizar este error Blumberg and Khanta<sup>7</sup> desarrollaron una versión amortiguada del esquema GWI:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C_0 \frac{\partial \phi}{\partial n} = - \frac{\phi - \phi_{ref}}{T_f} \tag{3}$$

donde  $T_f$  es el tiempo de escala de relajación en el cual la solución numérica es restaurada a su

valor de referencia ( $\phi_{ref}$ ) en el borde abierto. De acuerdo al forzante impuesto (marea o viento) fueron analizados tres tipos de condiciones en el borde. Una con  $t_f = 0.05$  en los tres bordes (GWI amortiguada), otra con  $t_f$  infinito en los tres bordes (GWI infinito) y la última con  $t_f = 0.05$  en el borde sur y  $t_f$  infinito en los bordes norte y oeste (GWI combinación de las anteriores). Cabe destacar que la condición de borde fue aplicada a todas las variables simultáneamente.

- *Prescripción de invariantes de Riemman*: Esta condición de borde también utiliza velocidad de fase fija ( $C_\phi = C_0$ ). Fue propuesta originalmente por Flather<sup>8</sup> y analizada extensivamente por Palma and Matano<sup>9</sup>. Combina la ecuación (2) con una versión unidimensional de la ecuación de continuidad, dando una ecuación para la velocidad normal en el borde abierto que permite la conservación de la masa en el dominio. Puede ser escrita como:

$$u = u_0(t) \pm \frac{C_0}{H} [\eta - \eta_0(t)] \quad (4)$$

donde  $U_0$  y  $\eta_0$  son valores prescriptos. El signo (+) es aplicado en los bordes Norte y Este del dominio computacional. Cabe destacar que en los casos donde la solución de estado estacionario es no nula (por ejemplo forzante de viento a lo largo de la costa) este esquema requiere una solución local para el cálculo de  $u_0$ ,  $\eta_0$ <sup>9</sup>.

- *Condiciones de radiación con velocidad de fase variable*: Orlanski<sup>6</sup> propuso calcular las velocidades de fase de las ondas incidentes en los bordes, utilizando una versión diagnóstico de la ecuación (2). En este trabajo se utiliza el siguiente esquema numérico implícito para el cómputo de  $C_\phi$ :

$$C_\phi = \frac{\phi_{B\pm 1}^{n-1} - \phi_{B\pm 1}^{n+1}}{\phi_{B\pm 1}^{n+1} + \phi_{B\pm 1}^{n-1} - 2\phi_{B\pm 2}^{n-1}} \quad (6)$$

donde  $B$  es el nodo del borde,  $n$  es el índice que indica el nivel del tiempo el signo (+) se aplica a los borde Sur y el (-) a los restantes. Una vez calculada la velocidad de fase, esta es utilizada en la ecuación (2) para flujos salientes y se establece igual a cero para flujos entrantes. Al igual que en el caso de GWI, aquí también se realiza el análisis modificando los valores de  $T_f$ . Las condiciones de borde fueron aplicadas en elevaciones y velocidades transversales al borde, ya que otras combinaciones se mostraron inestables para estos experimentos.

### 3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO Y EXPERIMENTOS NUMÉRICOS.

En esta sección se analizan cuatro experimentos numéricos. Los tres primeros se desarrollan en un dominio rectangular idealizado con tres bordes abiertos. La longitud a lo largo de la costa es de 1280 km y en ancho 640 km (Fig. 1a). El dominio comporta 128x64 nodos con una resolución de 10 km. La topografía de fondo representa una plataforma continental, el talud y océano profundo adyacente (Fig. 1b). En el borde costero (oeste) las componentes de la velocidad son nulas. En los bordes abiertos se implementan los esquemas discutidos en 2.2. El

cuarto experimento considera una simulación en un dominio realista de la Plataforma Continental Argentina .

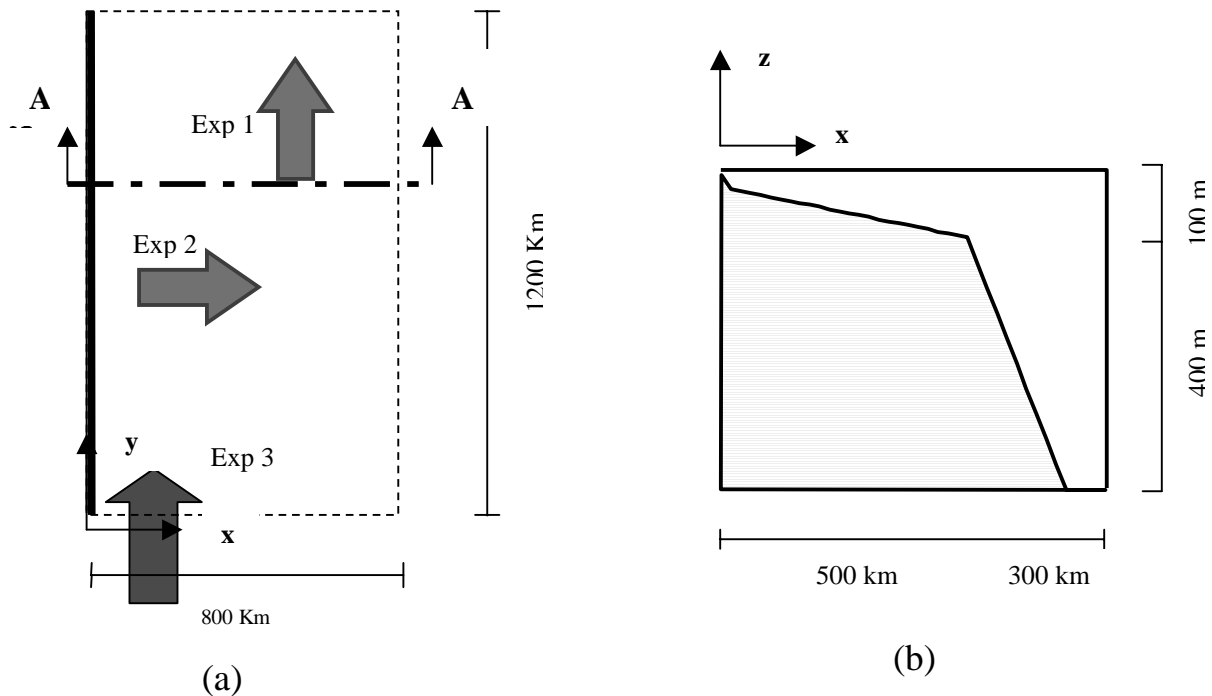


Fig. 1. (a) Dominio computacional de los experimentos idealizados. (b) Sección transversal A-A que muestra la topografía del fondo.

### 3.1 Experimento numérico 1: Viento a lo largo de la costa.

Para la comparación del comportamiento de las diferentes condiciones de borde adoptamos como experimento base los resultados de una corrida con CFA cíclicas (CIC). La utilización de estas CFA como referencia está basada en el hecho de que la solución numérica se ajusta muy bien a la solución analítica<sup>10</sup>. Empleando este diseño es posible además comparar la estructura vertical de las componentes de la velocidad. La figura 2a muestra los contornos de elevación de la superficie libre (SSH) en el día 60 de simulación empleando CIC cuando el modelo es forzado por un viento a lo largo de la costa de intensidad 0.1Pa y que decae exponencialmente aguas afuera con una escala de longitud de 200km.

- *FRO*: (Fig. 2b) se observa que los contornos de SSH son similares a los generados por CIC, aunque las isolíneas no son perfectamente paralelas a la costa. El perfil de velocidades perpendiculares a la costa en la zona central del dominio (Fig. 3b), es también similar al obtenido usando CIC, y no se observan perturbaciones importantes que lleguen desde los bordes abiertos.

- *GWI* ( $tf = \infty$ ): El flujo puede circular a través de los bordes y el perfil de elevaciones es similar al de CIC. Sin embargo la magnitud de las elevaciones es menor en este caso. La Fig. 2c muestra que las isolíneas de elevación están desplazadas hacia el oeste en GWI.

- *GWI* ( $tf = 0.05$ ): La naturaleza de las condiciones de borde no permite la existencia de transporte a través de ninguno de los bordes. Este efecto se ve reflejado nuevamente en las isolíneas de elevación (Fig. 2d), que forman curvas cerradas en todo el recinto. El efecto de las CBA genera además un flujo en dirección opuesta a la esperada entre los  $250\text{ km}$  y  $500\text{ km}$  (distancia medida desde la costa), que se ve reflejado en el perfil de velocidades transversales (Fig. 3d). Debido a esto, las velocidades en toda la sección transversal son menores a las esperadas y se genera una estratificación vertical hasta los  $200\text{ km}$ .

- *ORL* ( $tf = \infty$ ): El perfil de elevaciones es similar al de CIC, aunque se observa una perturbación importante en el borde norte (Fig 2e). Además, al igual que en *GWI*, las isolíneas están desplazadas hacia el oeste. El perfil de velocidades es similar al obtenido con *GWI*, aunque las magnitudes son algo mayores, especialmente en el borde oeste (Fig. 3c).

- *ORL* ( $tf = 0.05$  en el borde sur y  $tf = \infty$  en los bordes norte y oeste): Se observa que no hay transporte a través del borde sur. Las isolíneas de elevación son paralelas a la costa sólo en el borde norte (Fig. 2f), mientras que en el resto del dominio se ajustan al efecto del borde parcialmente cerrado del sur. La magnitud de las elevaciones es un orden de magnitud menor que en el caso CIC.

### 3.2 Experimento numérico 2: Viento transversal a la costa.

Este experimento numérico es otro ejemplo de respuesta al forzante por viento. En este caso se aplica sobre la superficie un viento transversal a la costa uniforme y de magnitud  $0.1\text{ Pa}$ . Las soluciones numéricas en estado estacionario se comparan con los resultados analíticos obtenidos por Csanady<sup>10</sup> (Fig. 4a).

- *FRO*: El perfil de elevaciones se ajusta muy bien al caso analítico (Fig. 4b). En la costa se observa un hundimiento de  $7\text{ cm}$  aproximadamente, el cual disminuye en forma inversamente proporcional a la profundidad, hasta llegar a un valor cercano a cero en el borde oeste. El campo de velocidades superficiales revela un flujo transversal a la costa en la plataforma interior (hasta los  $200\text{ km}$  aproximadamente) afectado por la fricción de fondo. Aguas afuera el vector velocidad rota hacia el noreste, resultado acorde con la teoría de Ekman<sup>10</sup>

- *GWI* ( $tf = 0.05$  en el borde sur y  $tf = \infty$  en los bordes norte y oeste): Debido al borde parcialmente cerrado en el sur, el flujo no logra desarrollarse completamente en este experimento. Por esta razón el campo de elevaciones no se ajusta a la solución analítica (Fig. 4c). Se observa un hundimiento de la superficie libre que alcanza su mínimo en el borde oeste ( $0.1\text{ cm}$ , muy por debajo de los valores esperados). Además este hundimiento llega sólo hasta los  $50\text{ km}$  y las isolíneas de elevación no llegan hasta el borde sur. A partir de los  $50\text{ km}$  y hasta los  $400\text{ km}$  se observa una elevación en la superficie libre, que no supera los  $0.01\text{ cm}$  y cuyas isolíneas conservan las características mencionadas anteriormente. En el resto del dominio las elevaciones son nulas. El campo de velocidades revela un flujo significativo a partir de los  $50\text{ km}$  de la costa en dirección noreste, que aumenta su magnitud hasta los  $600\text{ km}$ , donde se comporta similarmente al esquema *FRO*.

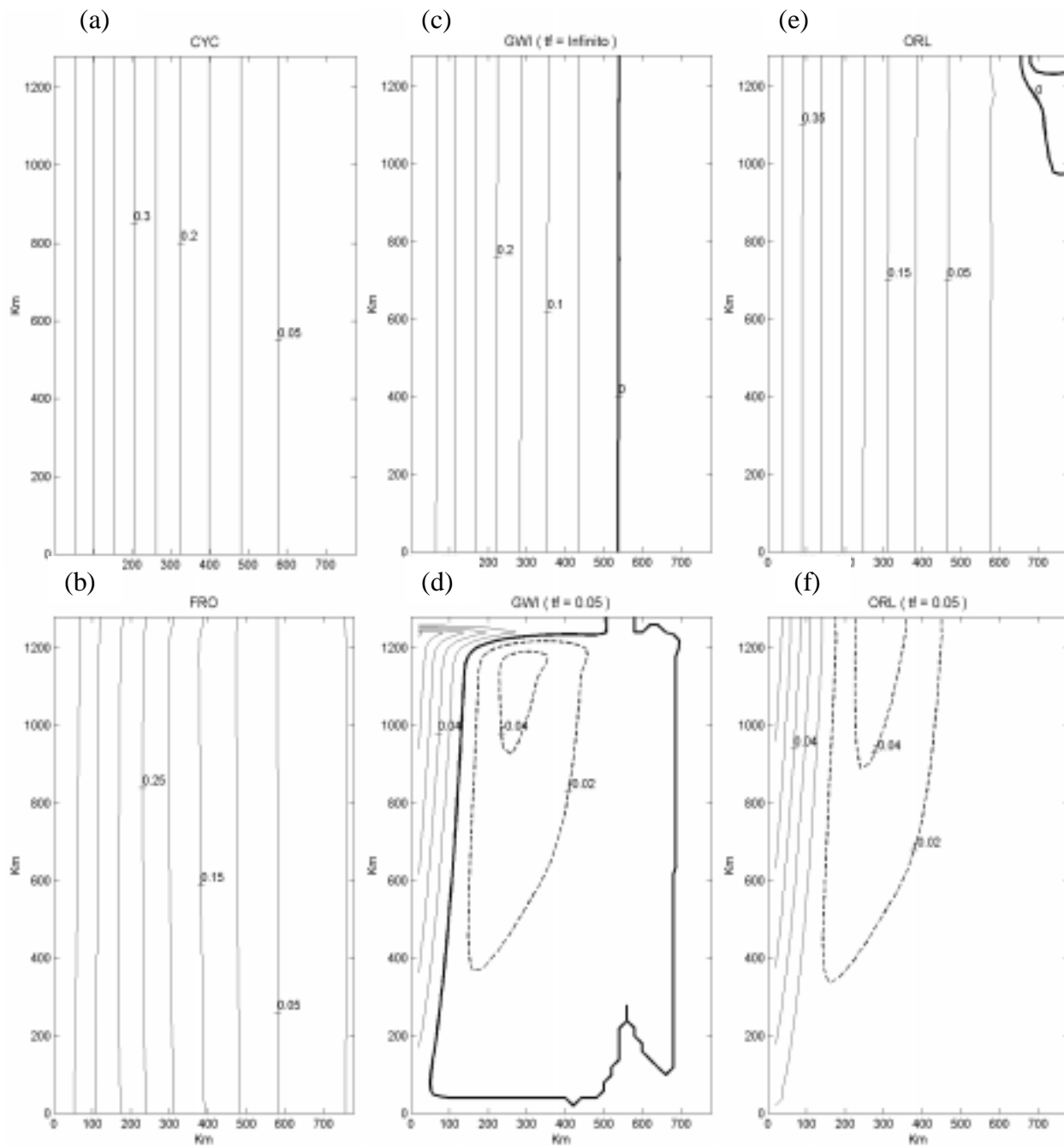


Fig. 2. Elevación de la superficie libre a los 60 días para el experimento de viento a lo largo de la costa. (a) CIC, (b) FRO, (c) GWI ( $T_f = \infty$ ), (d) GWI ( $T_f = 0.05$  en todos los bordes), (e) ORL, (f) ORL ( $T_f = 0.05$  en el borde Sur). Intervalo de contornos 5 cm.

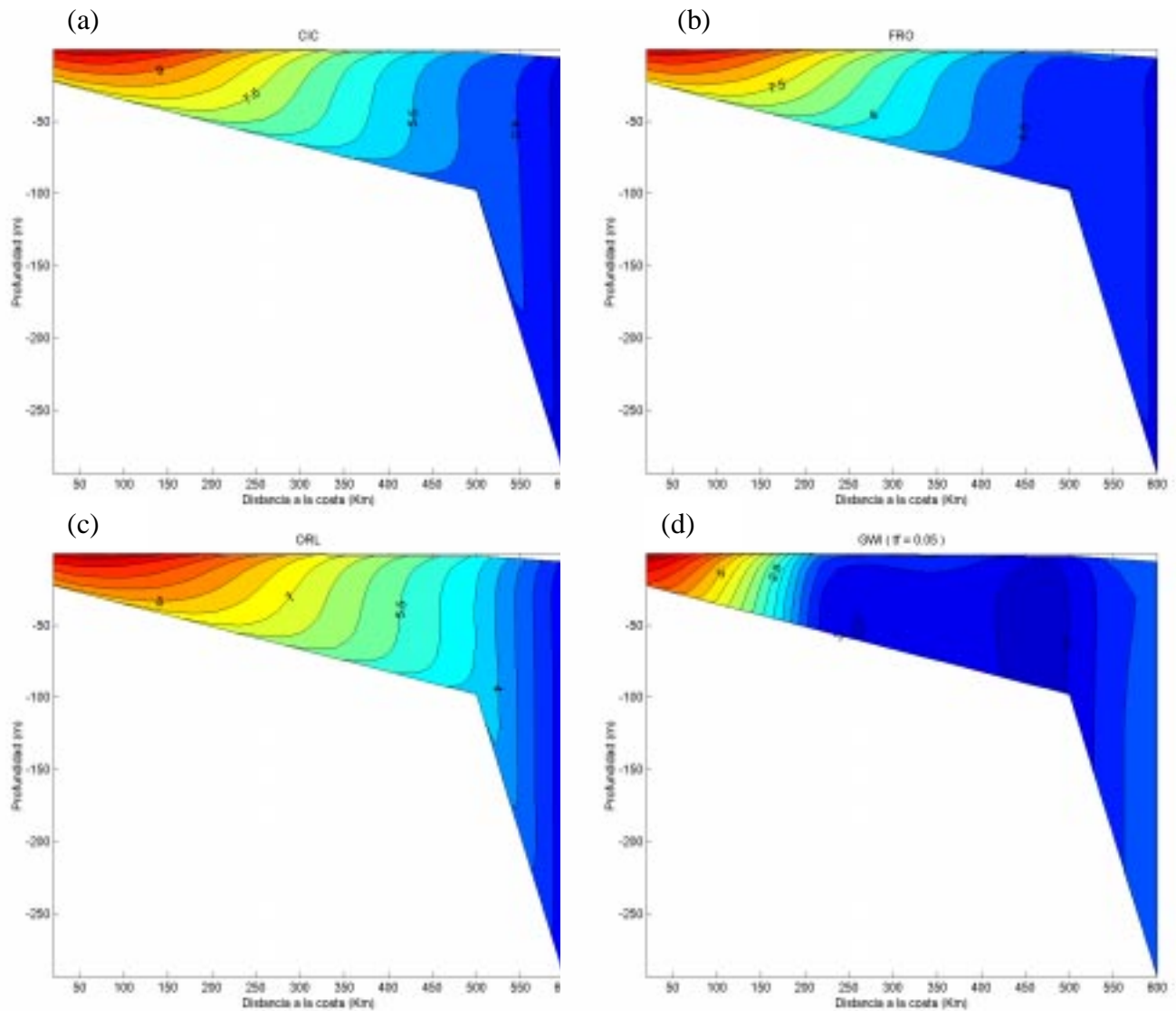


Fig. 3. Sección transversal de velocidad meridional ( $v$ ) a los 60 días para el experimento de viento a lo largo de la costa. (a) CIC, (b) FRO, (c) ORL, (d) GWI ( $T_f=0.05$  en todos los bordes). Intervalo de contornos  $0.5 \text{ cm/s}$

-  $GWI (t_f = \infty)$ : Las CFA permiten que exista flujo transversal en el borde sur por lo que las isolíneas de elevación logran ajustarse al caso real (fig. 4d). Sin embargo el flujo transversal a la costa originado en el estado transitorio y la variación en la topografía de fondo, generan ondas dispersivas que se propagan en dirección este-oeste. Como el esquema GWI no absorbe correctamente estas ondas, quedan en el recinto permanentemente y aumenta su amplitud a medida que transcurre el tiempo, haciendo que la solución resultante no sea aceptable. El campo de velocidades también se ve afectado por la onda remanente, la cual modifica tanto la dirección como la magnitud, principalmente en los bordes este y oeste.



- *GWI* ( $tf = 0.05$ ): Los bordes parcialmente cerrados impiden el desarrollo del flujo a través de los bordes norte sur. Por esta razón la magnitud de la velocidad es mucho menor que en FRO. Las isolíneas de elevación se ajustan a las CFA, generando curvas cerradas en el norte y en el sur. Además se observa la presencia de una onda que se propaga perpendicular a la costa y que genera hundimiento y elevación de la superficie libre en todo el recinto (fig. 4e). La solución resultante no es aceptable.

- *ORL*: Si bien las líneas de elevación son paralelas a la costa en el borde oeste, se observa la presencia de una onda espúrea que se propaga en dirección este-oeste, en el norte del recinto. El hundimiento generado por esta onda no supera los  $2\text{cm}$ . El hundimiento máximo en la costa es de  $4\text{ cm}$  (fig. 4f). El campo de velocidades es similar a FRO, aunque las magnitudes son menores.

### 3.3 Experimento numérico 3: Marea impuesta en el borde abierto.

Se estudia aquí la propagación de una onda de marea viajando en la dirección paralela a la costa. En un océano poco profundo, sin fricción, con profundidad constante, para una onda progresiva viajando en la dirección de  $y$ , con la línea costera al oeste, la solución analítica es (Fig. 5a):

$$\begin{aligned}\eta &= A e^{\frac{x}{R}} \text{Cos}(ky - \omega t), \\ v &= A \frac{c}{H} e^{\frac{x}{R}} \text{Cos}(ky - \omega t).\end{aligned}\tag{8}$$

Estas ecuaciones representan una onda de Kelvin viajando en la dirección de  $y$  (fig. 5a). Su amplitud decrece exponencialmente en la dirección de las  $x$  positivas si  $f < 0$ , mientras que  $u=0$  en todo el recinto. Se emplearon los siguientes parámetros: Amplitud  $A = 1\text{m}$ , Radio de deformación  $R = 250\text{km}$ , longitud de onda  $2\pi/k = 1280\text{km}$ , frecuencia  $\omega = 1.4\text{E-}4$ , profundidad  $H = 40\text{ m}$ ., velocidad de fase  $c = 20\text{m/s}$ .

- *FRO*: Se observa el decaimiento exponencial en la dirección perpendicular a la costa, tal como se esperaba de los cálculos analíticos. Sin embargo el decaimiento es más rápido, la amplitud máxima de la onda se observa a los  $340\text{ km}$  aproximadamente con FRO (fig. 5b), mientras que en el cálculo analítico está a  $440\text{ km}$  de la costa. La velocidad de propagación de la onda en FRO es consistente con la calculada analíticamente

*GWI* ( $tf = 0.05$  en el borde sur y  $tf = \infty$  en los bordes norte y oeste): La onda que se reproduce es similar a la solución analítica. Sin embargo se observa la presencia de una onda espúrea, en todo el recinto, especialmente al norte del borde oeste. Un análisis en el tiempo muestra que la perturbación a la onda aparece a medida que la onda de Kelvin llega al borde norte, y luego se propaga por todo el recinto, durante los primeros días esta perturbación es muy grande pero a medida que transcurre el tiempo esta onda se atenúa. La velocidad de propagación de la onda es compatible a la analítica. La magnitud de las elevaciones se reproduce aún mejor que en

FRO, en el sur, sin embargo al norte las amplitudes máximas se observan más cerca de la costa que en el caso analítico (fig. 5c)

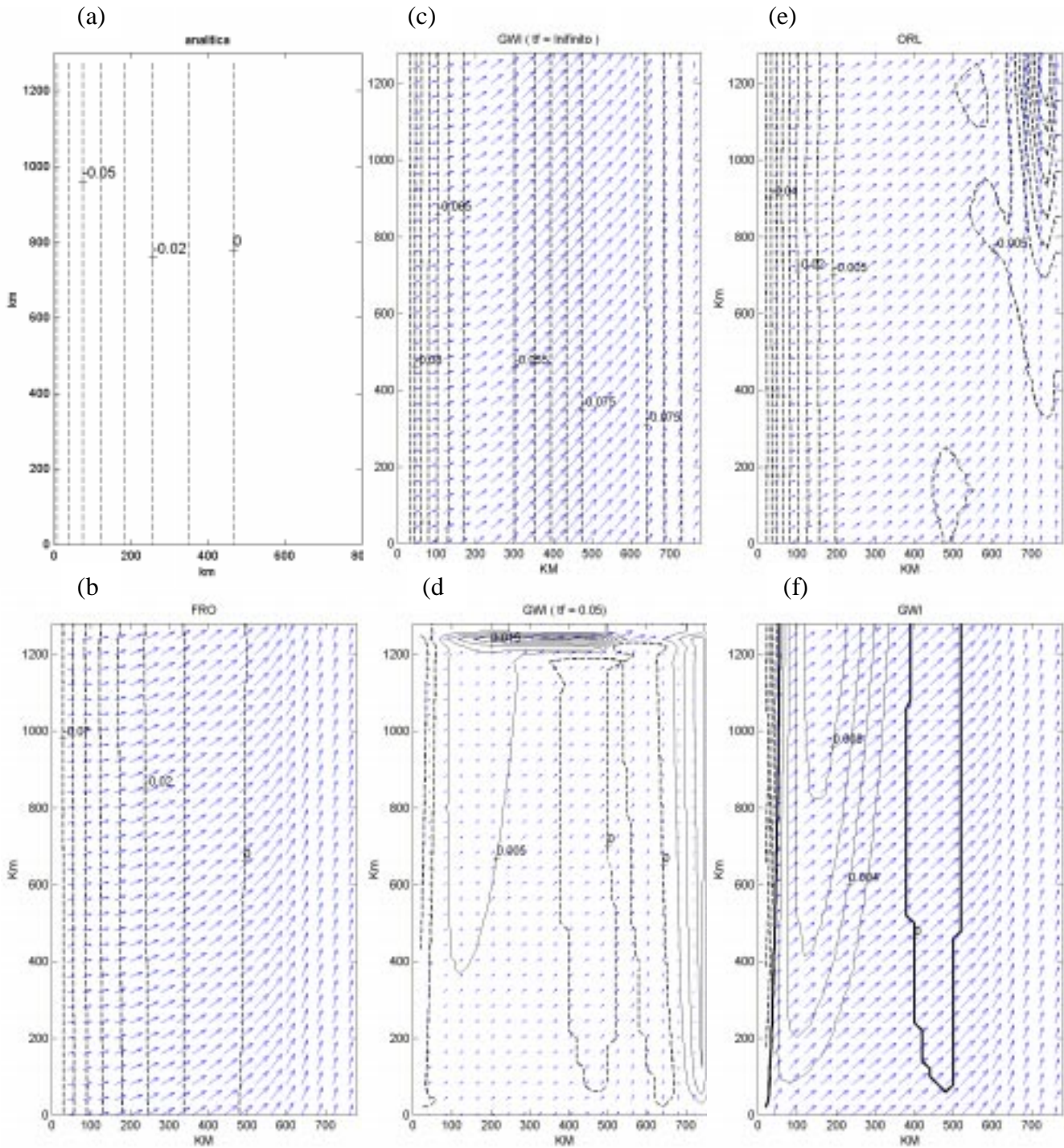


Fig. 4. Elevación de la superficie libre a los 60 días para el experimento de viento perpendicular a la costa y vectores velocidad superficial. (a) analítica, (b) FRO, (c) GWI ( $T_f = \infty$ ), (d) GWI ( $T_f = 0.05$  en todos los bordes). (e) ORL, (f) GWI ( $T_f = 0.05$  sólo en el Sur). Intervalo de contornos 1 cm

- *GWI* ( $tf = 0.05$ ): La onda espúrea aparece en el borde norte y se propaga como una onda de Kelvin, inicialmente hacia el este y luego a lo largo del borde este, dirigiéndose hacia el sur. Esto se debe a que con  $tf = 0.05$  los bordes están parcialmente cerrados y permiten la propagación de ondas atrapadas. Debido a la presencia de estas ondas en el recinto, la solución se hace inestable rápidamente, sin poder llegar al día tres (fig. 5d, día 2).

- *GWI* ( $tf = \infty$ ): La onda no logra ingresar en el recinto y los resultados no reproducen el cálculo analítico. La misma solución se obtiene empleando ORL con un tiempo de relajación infinito (Fig. 5e).

- *ORL* ( $tf = 0.05$ ): Al igual que en *GWI* aparecen ondas espúreas en el borde norte a medida que se propaga la onda de Kelvin. Sin embargo en este caso las perturbaciones se ven en toda la región, pero sólo afectando la forma de las isolíneas de elevación, sin propagarse a lo largo de los bordes norte y este. Observándose sólo a partir del día 4 una onda en el borde norte (fig. 5e). La magnitud y velocidad de propagación de la onda de Kelvin se reproduce bastante bien, pero la presencia de la onda remanente hace que esta solución no sea aceptable.

### 3.4 Experimento numérico 4: Modelo realista de Plataforma Continental Argentina.

Esta sección muestra la aplicación de la condición de borde FRO a un caso realista, la circulación oceánica inducida por vientos y marea sobre la Plataforma Continental Argentina. Los detalles de la compleja topografía submarina se muestran en la Fig. 6a. La figura 6b muestra la grilla curvilínea empleada en la discretización horizontal (resolución variable de 4 a 18 Km), de 250 x 126 puntos, con las correcciones adecuadas en la costa. Se utilizaron como forzante en el borde abierto, las cinco componentes principales de marea obtenidas de un modelo global<sup>11</sup>, y como forzante superficial, los vientos climatológicos de ECMWF<sup>12</sup>.

En la figura 7a, se observa la onda de marea (amplitud y velocidades medias) propagándose como una onda de Kelvin a lo largo de la costa, similarmente a lo visto en el experimento 3. El hecho de que la amplitud decaiga en la dirección de propagación de la onda se debe a los efectos de fricción de fondo, que no están considerados en el experimento idealizado. Estos resultados se hallan en buena concordancia con los obtenidos mediante un modelo bidimensional por Glorioso and Flather<sup>13</sup>.

La Fig. 7b muestra el campo de velocidades media y función de corriente de estado estacionario resultante de una simulación forzada por vientos y marea donde se ha extraído la corriente residual de marea. La Fig. 7c muestra el campo de velocidades media pero con forzante de viento solamente. Ambas figuras muestran un transporte medio de dirección NNE en la plataforma patagónica y dos giros de recirculación antihorario en el Golfo San Jorge y Bahía Grande. Estos resultados concuerdan con modelos de circulación basados en datos hidrográficos y con estudios de propiedades físico-químicas y de microorganismos planctónicos<sup>14</sup>. Los giros antihorarios han sido descritos previamente por Glorioso and Flather<sup>13</sup> en una simulación con un modelo bidimensional. Es interesante notar que la imposición simultánea de la onda de marea y el viento en el borde abierto (Fig. 7b) no perturba la solución forzada por vientos (Fig. 7c). Las diferencias más marcadas en la circulación

(menor intensidad de los giros costeros en Fig. 7b) se deben a la mayor fricción de fondo generada por la marea, la cual alcanza su mayor amplitud en la plataforma sur (Fig. 7a)

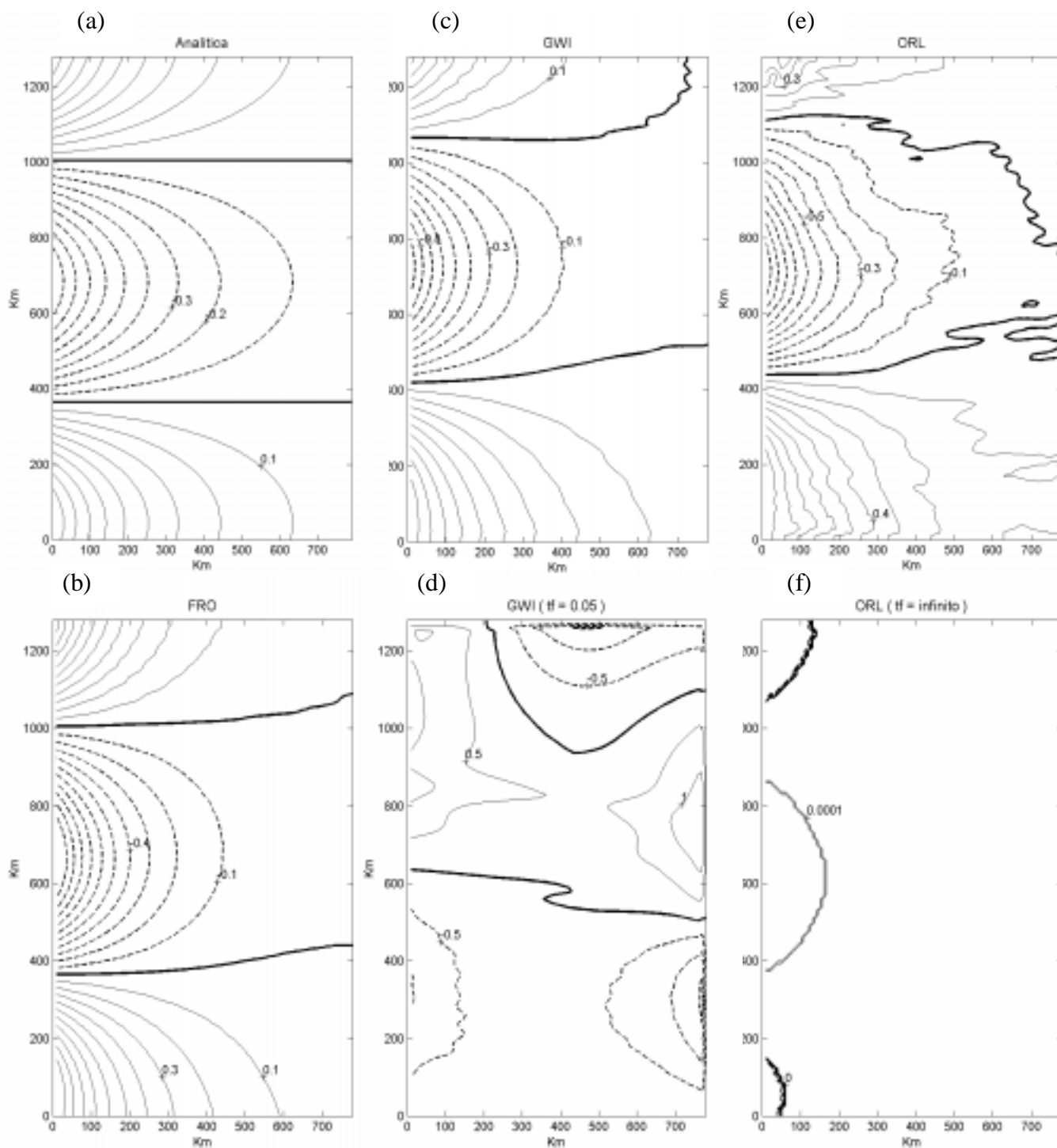


Fig. 5. Elevación de la superficie libre a los 4 días para el experimento de una onda de marea impuesta en el borde Sur. (a) analítica, (b) FRO, (c) GWI ( $T_f = \infty$ ), (d) GWI ( $T_f = 0.05$  en todos los bordes). (e) ORL, (f) ORL ( $T_f = \infty$ ). Intervalo de contornos 0.1 m.

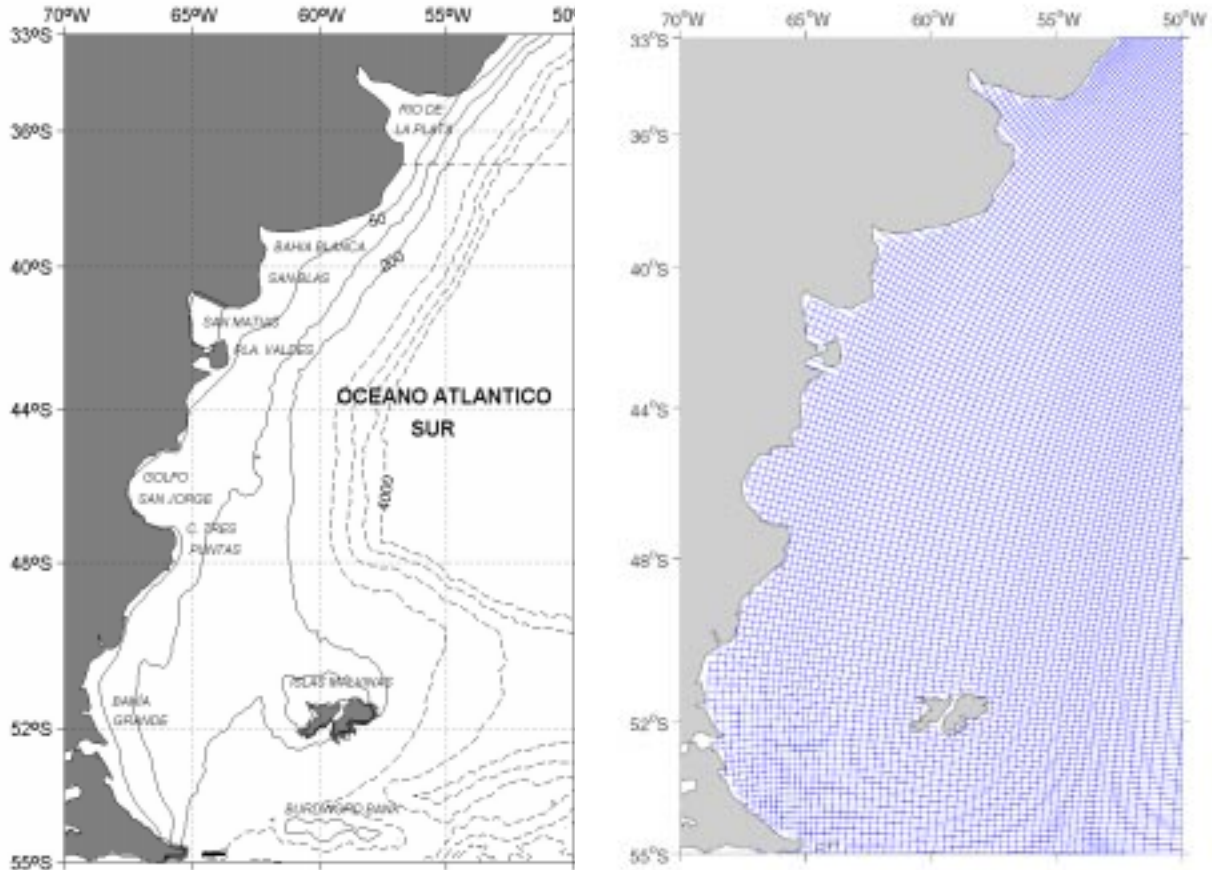


Fig. 6. (a) Dominio y topografía submarina del modelo de la Plataforma Continental Argentina (las profundidades se indican en metros). (b) Grilla curvilínea (se presenta sólo una de cada dos celdas)

#### 4 CONCLUSIONES.

Los resultados de varios experimentos numéricos idealizados que contemplan forzante con viento y marea muestran que la condición de borde de radiación FRO aplicada a las variables del modo externo y la condición de Orlandi (ORL) aplicada al modo interno funciona adecuadamente en todos los casos. Las condiciones de borde GWI ( $T_f = \infty$ ) y ORL funcionan adecuadamente para viento a lo largo de la costa pero presentan oscilaciones remanentes transversales a la costa en el caso de viento transversal. Estas mismas CFA no permiten la normal propagación de la onda de marea a menos que se introduzca un término excesivamente pequeño de damping ( $T_f = 0.05$ ). Por otro lado, las simulaciones forzadas con viento con  $T_f = 0.05$  muestran soluciones inaceptables. De esta forma aunque los esquemas GWI y ORL podrían emplearse son ciertos recaudos en simulaciones particulares (viento o marea) no son adecuadas para una situación dinámica que contemple la acción simultánea de viento y marea.

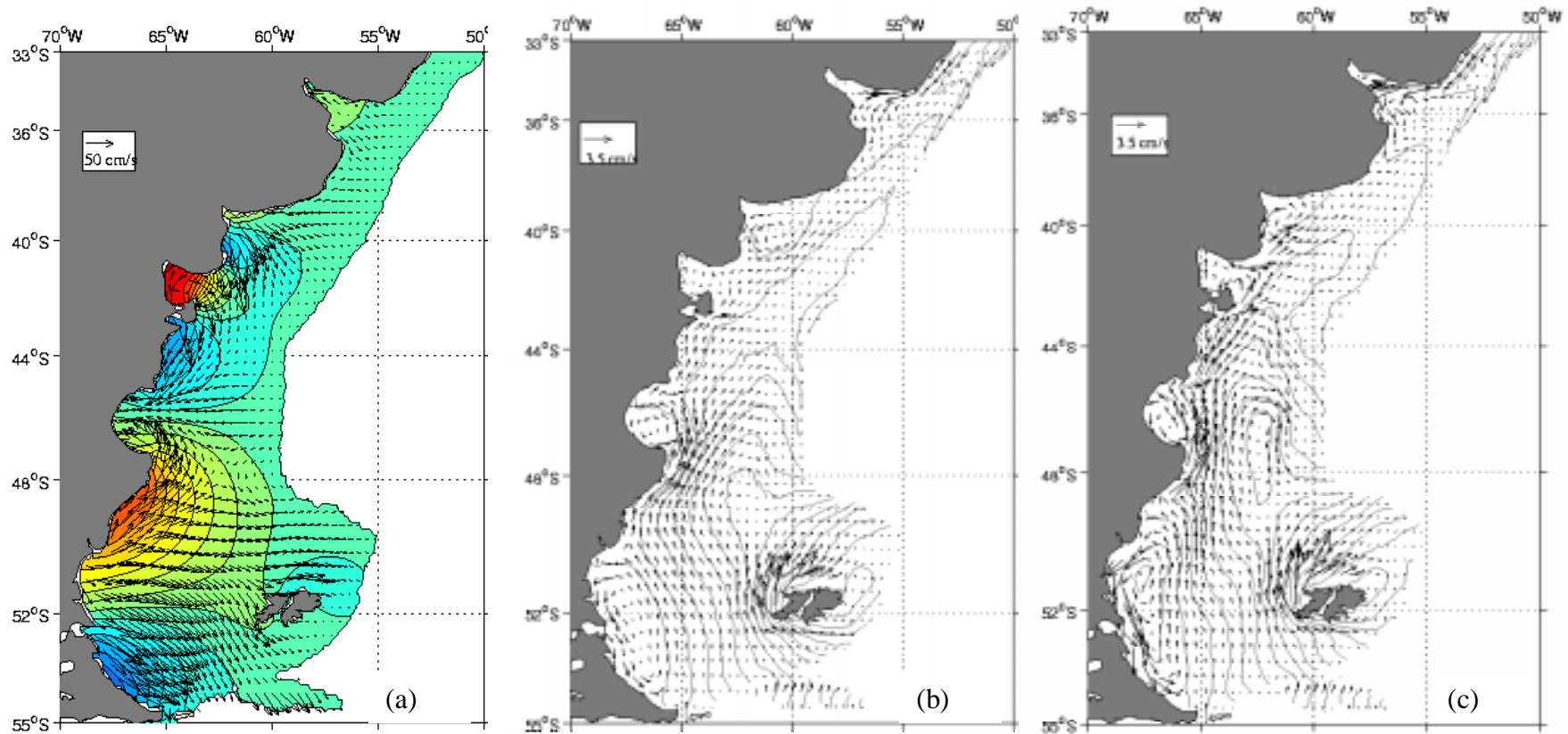


Fig. 7. Resultados del modelo numérico de la Plataforma Continental Argentina. (a) Elevación de la superficie libre y velocidad superficial de la corriente para el experimento forzado por mareas en los bordes (intervalo de contornos 20 cm). (b) Velocidad superficial de la corriente y función de corriente (línea llena fina) para el experimento forzado por vientos y marea (se muestran los resultados promedio una vez que se extrae la corriente residual de marea). (c) Velocidad superficial de la corriente y función de corriente para el experimento forzado por vientos solamente. En todos los casos sólo se muestran los resultados para profundidades menores a 1000m.

Los resultados numéricos de la simulación realista de la plataforma argentina se hallan en buena concordancia con resultados numéricos previos<sup>13</sup> y modelos basados en la distribución de parámetros físicos y biológicos<sup>14</sup>. Esto demuestra que la condición FRO funciona además correctamente en una situación que contempla una línea costera y topografía submarina realista y compleja. Además de admitir la imposición de la marea en los bordes abiertos el esquema FRO permite que la superficie libre evolucione libremente ante la acción del viento sin perturbar apreciablemente la solución en el interior del dominio.

## 5 REFERENCIAS.

- [1] D.R. Lynch and A.L. Davies, *Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models*, Coastal and Estuarine Studies, Vol. 47, American Geophysical Union, 1995.
- [2] D.B. Haidvogel and A. Beckmann, *Numerical Models of the Coastal Ocean*, in *The Sea*, Vol. 10, edited by K. Brink and A. Robinson, John Wiley & Sons, 1998.
- [3] A. F. Bennet and P. E. Kloeden, *Boundary conditions for limited-area forecasts*, J. Atmos. Sci. 35, 990-996, 1978.
- [4] D. C. Chapman, *Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model*, J. Phys. Oceanogr. 15, 1060-1075, 1985.
- [5] A. F. Blumberg and G. L. Mellor, *A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model*, in *Three Dimensional Coastal Ocean Models*, Coastal Estuarine Sci., vol4, pp 1-16, American Geophysical Union, 1987.
- [6] I. Orlanski, *A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows*, J. Comp. Phys., 21, 251-269, 1976.
- [7] A. F. Blumberg and L. H. Khanta, *Open boundary conditions for circulation models*, J. Hydraul. Eng., 11, 237-255, 1985.
- [8] R. A. Flather, *A tidal model of the northwest European continental shelf*, Mem. Soc. R. Sci. Liege, Ser., 6, 10, 141-164, 1976.
- [9] E. D. Palma and R. P. Matano, *On the implementation of passive open boundary conditions for a General Circulation Model : The barotropic mode*. J. Geophys. Res., 103, 1319-1341, 1998.
- [10] G. Csanady, *Circulation in the coastal ocean*, Reidel Publishers, 1982.
- [11] G. D. Egbert, Egbert, A. F. Bennet, and M. G. G. Foreman, *TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model*, J. Geophys. Res., 99, 24821-24852, 1994.
- [12] K. E. Trenberth., W. G. Large, and J. G. Olson, *The mean annual cycle in global wind stress*, J. Phys. Oceanogr., 20, 1742-1760, 1990.
- [13] P.D. Glorioso and R. A. Flather, *A barotropic model of the currents off SE South America*. J. Geophys. Res., 100: 13427-13440, 1995.
- [14] A. R. Piola y A. L. Rivas, *Corrientes en la plataforma continental*, en *El mar argentino y sus recursos pesqueros*, Vol. 1, editado por E. E. Boschi, 119-132, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Mar del Plata , Argentina, 1997.